

Р. А. Иванов, В. Д. Селезнёв

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ В МЕТОДЕ 3D ПЕЧАТИ НА ПРИМЕРЕ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ

Производится изучение процесса селективного лазерного плавления (SLM) — технологии 3D печати. Средствами пакетов Digimat и Ansys произведено моделирование и расчет объемного температурного поля. На порошке Al получены опытные данные построения детали. Произведено сравнение результатов предложенной компьютерной модели и натурального эксперимента.

**Ключевые слова:** *SLM, селективное лазерное плавление, лазерное излучение, моделирование, Ansys, Digimat.*

The paper is devoted to computer modeling of temperature distributions and experimental data analysis of the selective laser melting process (SLM) in 3D printing technology, on the example of aluminum powder.

**Keywords:** *SLM, selective laser melting, laser radiation, modeling, Ansys, Digimat.*

В настоящее время одним из быстрорастущих направлений современной промышленности являются аддитивные технологии (АТ) — послойное создание объемных структур или 3D печать. Наибольший технологический интерес представляет изготовление конечных деталей из металлов. Нюанс данного производства состоит в том, что течение процесса лазерной обработки порошкового слоя (композитного материала) и точность полученных в результате конечных изделий, с определенными характеристиками и свойствами, зависят от большого числа факторов, таких как: мощность, длина волны и размера фокусирующего пятна лазерного излучения, параметров порошкового материала (композита), свойств исходного сплошного материала, сценария обработки и т. д. Все эти характеристики определяют физику процесса и, соответственно, математический аппарат, который впоследствии определяет методику (программу) обработки.

В силу большой коммерческой ценности большинство исследований в этом направлении не имеют широкой огласки, а уже существующие установки селективного лазерного плавления спроектированы так, чтобы к пользователю поступало как можно меньше информации о процессе. Но стоит отметить, что даже самые современные системы подобного рода создают изделия, далекие от идеала как по качеству, так и по скорости их печати.

### Селективное лазерное плавление

В основе этого метода лежит последовательная реализация сечений объемных объектов, путем сканирования лазерным излучением тонких (20...100 мкм) слоев ме-

таллического, мелкодисперсного, сферодизированного порошка, с полным переходом его в жидкую фазу внутри треков расплава.

Следовательно, одной из основных частей в SLM производстве является лазерная система. Установлено, что использование лазеров с длиной волны 1...1,1 мкм для нагрева металлов и карбидов предпочтительнее, поскольку они на 25...65 % [1] лучше поглощают генерируемое лазером излучение, чем при обработке длинноволновыми аналогами.

Также, немаловажными являются характеристики обрабатываемой порошковой среды, которые значительно отличаются от таковых у их сплошных «братьев» и во многом зависят от способов нанесения и уплотнения.

При воздействии коротковолнового ( $\lambda \approx 1$  мкм) лазерного излучения на сфероподобные металлические частицы с размером больше 12 мкм, процесс рассеяния-поглощения инфракрасного излучения происходит аналогично сплошной среде [2].

Стоит отметить и то, что процессы скоростной, точечной, высокотемпературной обработки металлов характеризуются быстрыми, по сравнению с плавлением, процессами кристаллизации ( $V_k > 10^3$  К/с) [2]. И этот факт позволяет делать значительные упрощения в описании.

### Моделирование

Средствами программного пакета Digimat, используя описание сплошного материала и информации о микроструктуре (объемные доли и т. д.), генерируя внутреннюю геометрию, применяя процедуру гомогенизации, создают модель композитной среды [3].

Модель облучения получена из совмещения цилиндрического и гауссовского распределения энергии лазерного излучения [4]:

$$\bar{q} = (1 - e^{-2})\alpha \frac{P}{\pi R^2} = 0,864\alpha \times q_{cyl},$$

где  $P$  — мощность лазера,  $R$  — радиус пучка,  $\alpha$  — коэффициент поглощения.

Температурное поле рассчитывается методом конечных элементов и может быть представлено в виде квазистационарной задачи для движущегося источника тепла с использованием уравнения теплопередачи Фурье [5]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q},$$

где  $\rho$  — плотность,  $C$  — удельная теплоемкость,  $k$  — теплопроводность,  $v$  — скорость, а  $\dot{q}$  представляет собой мощность источника тепла.

Дополнительные и граничные условия:

– Разогрев всего порошка от подложки:  $T = T_0$

– Поверхностная конвекция (закона охлаждения Ньютона-Рихмана):  $q_{conv} = -h(T - T_0)$ , где  $q_{conv}$  — поток тепла охлаждения на единицу площади, а  $h$  — коэффициент конвективной теплопередачи.

**Параметры обработки и характеристики материалов**

Гранулометрический анализ расходного материала из сплава Al показал, что средний размер частиц порядка 20 мкм, а содержание частиц с размером менее 12 микрон составляет около 17 %, и их оптический вклад при моделировании можно не учитывать (рис. 1). Но «рыхлая» структура обрабатываемой порошковой поверхности вносит свой вклад. Таким образом, коэффициент поглощения порошка Al 0,33, тогда как у сплошного материала это значение ~0,12.

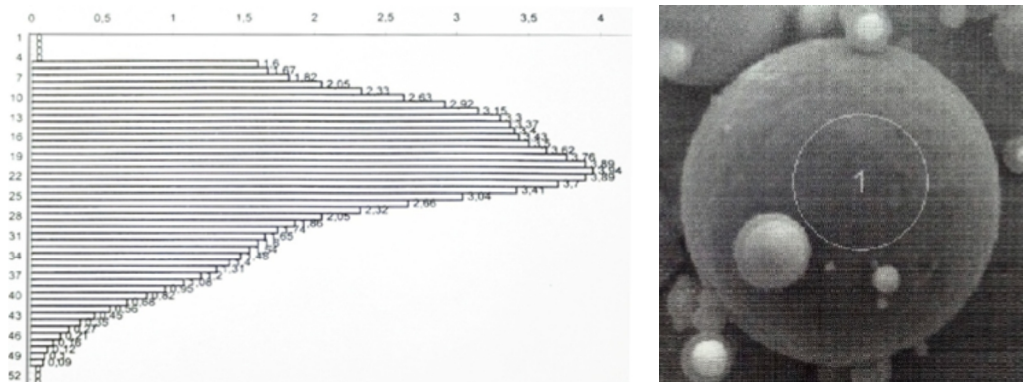


Рис. 1. Гранулометрический анализ

При насыпке происходит прижимание ножом, в результате плотность составляет 28 % от теоретической плотности сплошного материала.

Остальные параметры восстанавливаются средствами пакета Digimat [3].

В табл. 1 представлены параметры функционирования модели и реальной аддитивной SLM-машины.

Таблица 1

*Режим работы SLM*

Мощность	400 Вт
Скорость сканирования	2 378 мм/с
Диаметр пятна лазера	100 мкм
Слой порошка	40 мкм
Температура камеры	40 °С
Температура платформы	100 °С
Расстояние между центральными линиями треков расплава	140 мкм
Размер порошинки	20 мкм

Печать происходит по зигзагообразному пути (рис. 2), на стальной (ALSI 310) подложке, размеры которой можно считать бесконечными в сравнении с областью сканирования. В модели процесса последовательно сканируется 5 слоев, на каждом из которых реализуется квадратная площадка со стороной 1 мм. Камера построения заполнена инертным газом аргоном.

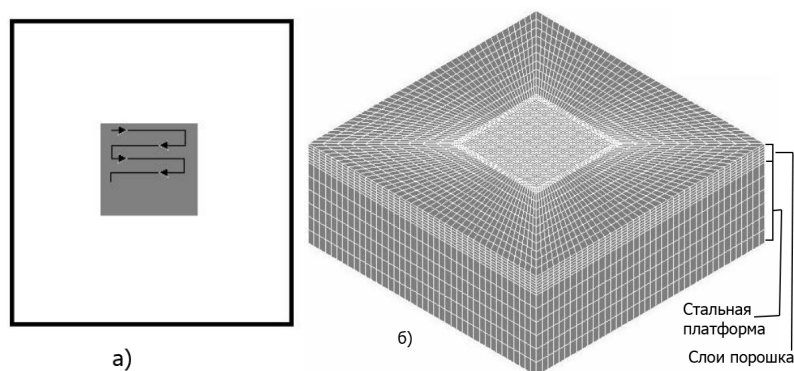


Рис. 2. а) — трек сканирования и б) — платформа построения

Функционирование модели и натурального эксперимента отличается длиной треков и изменением их ориентации при переходе в новый слой, все остальные параметры идентичны.

### Результаты моделирования и эксперимента

Из анализа внутренней структуры изделия по косому сечению следует: частицы порошка полностью расплавляются, образуя характерные области сканирования (рис. 3). Измерение геометрии последних говорит о том, что: примерный объемный образ ванны расплава — парабола, поверхностная ширина линии (треков) расплава составляет 160...220 мкм, величина зацепления соседнего трека 38...48 мкм, т. е. присутствует область двойного сканирования, это аргументировано стремлением к целостности получаемого изделия: отсутствия нерасплавленных пустот, которые пагубно сказываются на прочностных характеристиках.

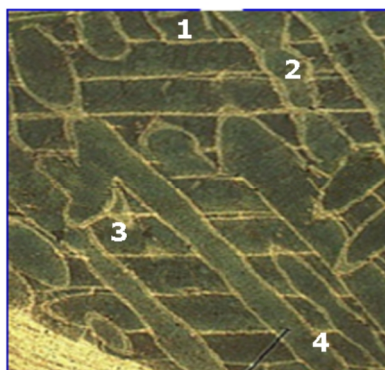


Рис. 3. Срез изделия по ГОСТ 1497, тип III

Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментом. На рис. 3 и 4 цифрами 1–4 проведена параллель между моделированием лазерного сканирования и реальным срезом детали в результате аналогичного процесса обработки. Максимальное отклонение геометрии треков расплава не превышает 20 %.

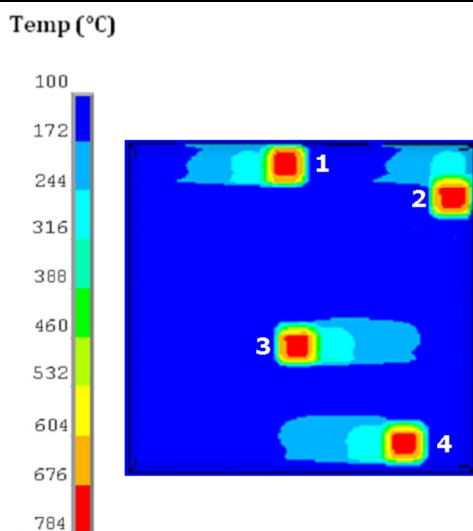


Рис. 4. Моделирование сканирования

Изображение лазерного воздействия, демонстрирует тепловые градиенты в порошковом слое: процесс имеет локальный характер, скорость возвращения к параметрам окружающей среды 0,7 мс (рис. 5а), отклонение нагрева вдоль движения материала 650 мкм (рис. 5б) поперек движения 230 мкм, наблюдается явный «скос» температурного градиента в сторону сплошного материала.

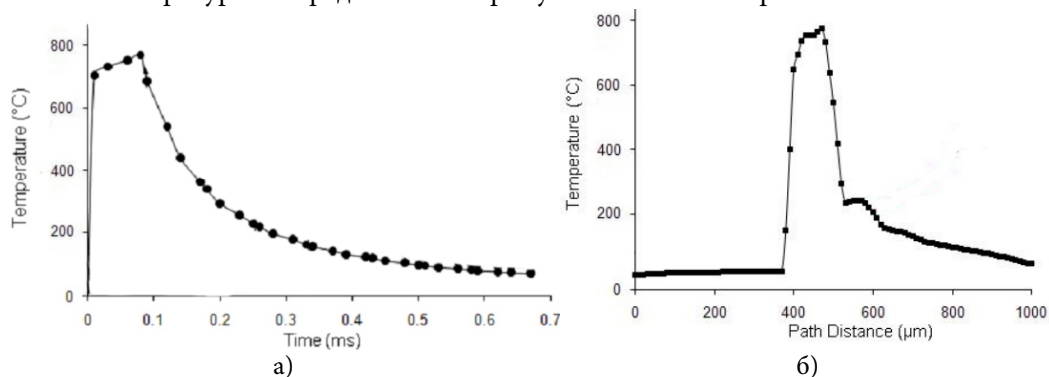


Рис. 5. а) — скорость остывания и б) — температура вдоль трека точки 3

Важным результатом является зафиксированное изменение параметров теплоотвода по слоям. Из него следует, что первый слой порошка, который наносится непосредственно на стальную пластину-платформу, при сканировании, имеет наиболее низкую максимальную температуру, в результате сильного теплоотвода в подложку (рис. 6).

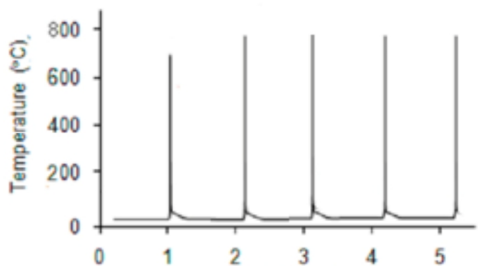


Рис. 6. Максимальный нагрев каждого слоя

Но в данном наблюдении интересно то, что уже второй слой обладает максимальной температурой, присущей всем последующим насыпкам (табл. 2). Т. е. влияние стальной пластины нивелируется первым 40-микронным слоем.

Таблица 2

Изменение температуры по слоям

Слой	1	2	3	4	5
Температура, °C	692	783	784	781	784

Учитывая последний факт, глубину проплавления слоя порошка следует измерять начиная со 2-го слоя. В случае движения со скоростью 2378 мм/с величина проплавления составила  $\approx 55$  мкм (рис. 7).

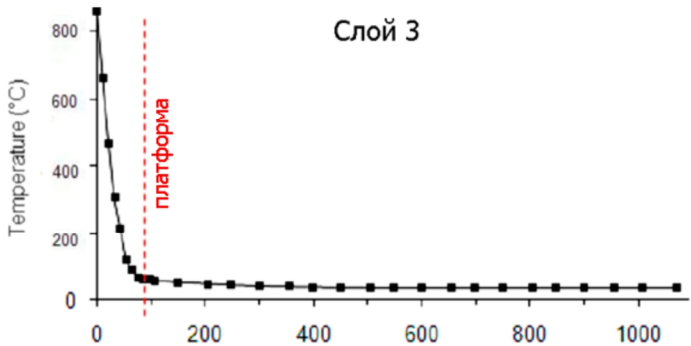


Рис. 7. Зависимость прогрева лазерным излучением от глубины

**Заключение и выводы**

Разработана методология моделирования процесса селективного лазерного плавления порошков, учитывающая свойства композитных материалов. Результаты позволяют сделать вывод о течении тепловых процессов в SLM, а также получить геометрические параметры треков сканирования, по которым можно оптимизировать методы обработки.

В частности для случая взаимно перпендикулярного сканирования слоев с параметрами представленными табл. 1 для порошка алюминия, мы имеем ванну расплава с поверхностным диаметром 180 мкм и глубиной проплавления 55 мкм. Следовательно, для обеспечения целостности, т. е. отсутствия непроплавленных областей необходимо обеспечить тройное зацепление: соседних треков сканирова-

ния и предыдущего слоя. Для вышерассмотренного случая при выбранных параметрах такая точка располагается на 2 мкм ниже конца нового порошкового слоя, что обеспечивает отсутствие дефектов (рис. 8).

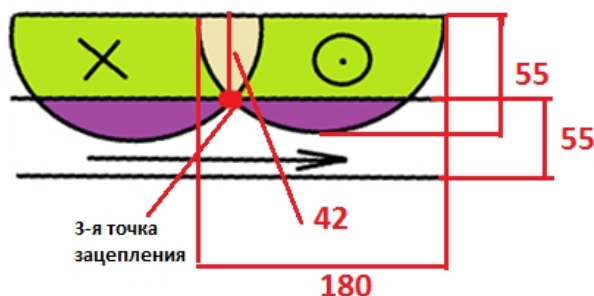


Рис. 8. Вариант оптимального взаимного пересечения треков и слоев

Данная методика применима к другим аналогичным системам и гибко подстраивается под разные параметры. Но достаточна только для начальной разработки сценария лазерной обработки. Для уменьшения величины отклонений от реального изделия необходимо учитывать процессы внутреннего структурообразования. Также дальнейшее развитие модели подразумевает учет внутренних напряжений.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Инновационно-внедренческого центра Регионального инжинирингового центра (ИВЦ РИЦ).

### Литература

1. Yin J., Zhu H. *et al.* Simulation of Temperature Distribution in Single Metallic Powder Layer for Laser Micro-Sintering // Computational Materials Science. 2012. Vol. 53(1). P. 333–339.
2. Digimatto Ansys. Document. Version 1.0. October 2007. P. 3–10.
3. Crafer R. C., Oakley P. J. Laser Processing in Manufacturing // Chapman & Hall. 1993. Vol. 10. P. 195–200.
4. Chen W.-L., Yang Y.-C., Lee H.-L. Estimating the Absorptivity in Laser Processing by Inverse Methodology // Applied Mathematics and Computation. 2007. Vol. 190(1). P. 712–721.
5. Гегузин Я. Е. Физика спекания. М.: Наука, 1984. 312 с.
6. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report // Wohlers Report. 2013. P. 130–153.
7. Бурыка В. А., Фокин В. Г., Кураева Я. В. Инженерный анализ в ANSYSWORKBENCH: Учеб. Пособие. СГТУ, 2013. 140 с.
8. Stefanescu D. M. Fundamentals of Solidification, Metallography and Microstructure. ASM Handbook, ASM International, 2004. Vol 9. 157 p.